Journal of Horticultural Science
https://jhs.um.ac.ir

Research Article
Vol. 39, No. 1, Spring 2025, p. 155-172

Investigation of Seed Germination Parameters and Morphophysiological Traits of *Tagetes erecta* (*Tagetes erecta* Antigua orange) in Response to Different LED Light Qualities

R. Abaszadeh Farouji[1], A. Hatamzadeh[1*], A. Sharifi[2], M. Kharrazi[2]

1- Horticulture Department, Agriculture College, University of Guilan, Rasht, Iran
2- Horticultural Plants Biotechnology Department, Research Institute for Industrial Biotechnology, Iranian Academic Centre for Education, Culture and Research (ACECR), Khorasan Razavi Branch, Mashhad, Iran
(*- Corresponding author's Email: hatamzadeh@guilan.ac.ir)

Received: 13-08-2024
Revised: 26-09-2024
Accepted: 28-09-2024
Available Online: 28-09-2024

How to cite this article:
Abaszadeh Farouji, R., Hatamzadeh, A., Sharifi, A., & Kharrazi, M. (2025). Investigation of seed germination parameters and morphophysiological traits of *Tagetes erecta* (*Tagetes erecta* Antigua orange) in response to different LED light qualities. *Journal of Horticultural Science*, *39*(1), 155-172. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jhs.2024.89366.1370

Introduction

Light is recognized as a vital factor for plant growth and development. Plants convert light energy into chemical energy through photosynthesis, which is then used for growth and development. Quality, intensity, and photoperiod are among the factors that directly affect plant growth and development processes. In recent years, Light-Emitting Diode (LED) technology has gained significant popularity in agriculture due to its numerous advantages over traditional light sources. These advantages include the ability to produce various light spectra, low energy consumption, long lifespan, and reduced heat emission. These characteristics have made LEDs an ideal light source for cultivating plants in controlled environments such as greenhouses and growth chambers. The primary objective of this study was to investigate the effects of different LED light qualities on the morphological, physiological, and germination traits of marigold (*Tagetes erecta*) seeds. Given the importance of light in plant growth and the benefits of LED technology, this study can provide valuable insights for improving crop cultivation and production.

Materials and Methods

This experiment was conducted in the Biotechnology Laboratory of Horticultural Plants in the Academic Center for Education, Culture and Research of Khorasan Razavi. F1 hybrid seeds were used in this study. The experimental treatments consisted of five light qualities: white light (100%), blue light (100%), red light (100%), 30% blue light + 70% red light, and 70% blue light + 30% red light. All treatments were subjected to a 16-hour light and 8-hour dark photoperiod using LED grow lights. The photosynthetic photon flux density (PPFD) was maintained at a constant 100 $\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$ for all light treatments. Seed germination parameters (seed germination percentage, mean germination time, germination rate, radicle length, plumule length, lateral roots number, plumule fresh weight, radicle fresh weight, plumule dry weight and radicle dry) were initially measured in Petri dishes under the growth panels. Subsequently, seeds were sown and grown under the growth panels, and physiological and morphological parameters including plant height, first internode length, stem diameter, node number, leaf area, leaf length, leaf number, lateral shoot number, shoot fresh weight, shoot dry weight, shoot fresh/dry weight ratio, root fresh weight, root dry weight, root fresh/dry weight ratio, dry matter, root length, electrolyte leakage, relative leaf water content and chlorophyll content were measured every 15 days for a total of four measurements.

https://doi.org/10.22067/jhs.2024.89366.1370

Results and Discussion

Seed germination indices showed that the lowest mean germination time, highest germination rate, longest radicle length, hypocotyl length, number of lateral roots, and fresh weight of radicles were observed under 100% red light treatment, followed by the 70% red + 30% blue light treatment. The application of 100% red light improved germination rate, radicle length, hypocotyl length, number of lateral roots, and fresh weight of radicles by approximately 14%, 29%, 48%, 100%, and 67%, respectively, compared to the control. Plants grown under 100% red light exhibited the greatest plant height at both the beginning and end of the growth period. At the end of the growth stage (75 days after sowing), plants under 100% red light showed increases of approximately 37%, 6%, 33%, and 31% in stem diameter, length of the largest compound leaf, number of leaves, and number of branches, respectively, compared to the white light treatment at the same growth stage. Additionally, the fresh and dry weights of plants increased by approximately 56% and 9%, respectively, compared to the control at the same growth stage. A study of the fresh and dry weights of roots showed that the application of 100% red light increased these two indices by nearly 3 times compared to the control. The lowest fresh and dry root weights were observed under 100% blue light treatment, followed by the 30% red + 70% blue light treatment. Furthermore, plants grown under 100% red light exhibited higher relative water content and lower electrolyte leakage in leaves compared to plants grown under other light treatments.

Conclusions

The research findings indicated that the application of light-emitting diodes (LEDs) with various light qualities enhanced the growth conditions of *Tagetes erecta Antigua orange*. Comparisons among the light treatments showed that application of 100% red light resulted in increased germination percentage and rate in marigold seeds. Furthermore, the application of red light under controlled conditions led to an increase in plant growth indices compared to other experimental treatments. Therefore, application of red light at different growth stages of maigold under controlled conditions is recommended.

Keywords: Artificial light, Blue light, Ornamental plant, Red light

نشریه علوم باغبانی
https://jhs.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۳۹، شماره ۱، بهار ۱٤۰٤، ص. ۱۷۲-۱۵۵

مطالعه شاخص‌های جوانه‌زنی بذر و صفات مورفوفیزیولوژیک گل جعفری (*Tagetes erecta* Antigua orange) در کیفیت‌های مختلف نور LED

رسول عباس زاده فاروجی[۱]- عبدالله حاتم زاده[۱*]- احمد شریفی[۲]- مهدیه خرازی[۲]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۰۷

چکیده

به‌منظور مطالعه شاخص‌های مورفوفیزیولوژیک و جوانه‌زنی بذر گل جعفری (*Tagetes erecta* Antigua orange) در پاسخ به کیفیت‌های مختلف نور LED، تحقیق حاضر در گروه بیوتکنولوژی علوم باغبانی جهاد دانشگاهی خراسان رضوی انجام گرفت. تیمارهای آزمایش شامل پنج کیفیت نور سفید (۱۰۰ درصد)، نور آبی (۱۰۰ درصد)، نور قرمز (۱۰۰ درصد)، ۳۰ درصد نور آبی + ۷۰ درصد نور قرمز و ۷۰ درصد نور آبی + ۳۰ درصد نور قرمز بود. در ابتدا، شاخص-های جوانه زنی بذر در ظروف پتری دیش در زیر پنل‌های نوری اندازه‌گیری گردید و پس از کاشت بذرها در زیر پنل‌های نوری، شاخص‌های فیزیولوژیک و مورفولوژیک گیاه در فاصله زمانی ۱۵ روز یک‌بار در چهار مرحله اندازه‌گیری گردید. مطالعه شاخص‌های جوانه‌زنی نشان داد که کمترین میانگین زمان جوانه زنی، بیشترین سرعت جوانه‌زنی، بیشترین طول ریشه‌چه، طول ساقه‌چه، تعداد ریشه جانبی و وزن تر ریشه‌چه در تیمار نور قرمز (۱۰۰ درصد) و پس از آن در تیمار نور قرمز (۷۰ درصد) + نور آبی (۳۰ درصد) مشاهده شد. استفاده از نور قرمز (۱۰۰ درصد) سرعت جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه، طول ساقه‌چه، تعداد ریشه جانبی و وزن تر ریشه‌چه را به‌ترتیب تقریباً ۱۴، ۲۹، ۴۸، ۱۰۰ و ۶۷ درصد در مقایسه با شاهد بهبود بخشید. بیشترین ارتفاع گیاه در ابتدا و انتهای رشد مربوط به گیاهان رشدیافته در تیمار نور قرمز (۱۰۰ درصد) بود. در انتهای مرحله رشدی (۷۵ روز پس از کشت بذر) گیاهان تحت تیمار نور قرمز (۱۰۰ درصد) از لحاظ قطر ساقه، طول بزرگ‌ترین برگ مرکب، تعداد برگ و تعداد شاخه جانبی به‌ترتیب تقریباً ۳۷، ۶، ۳۳ و ۳۱ درصد در مقایسه با تیمار نور سفید در همان مرحله رشدی افزایش داد. علاوه‌براین، وزن تر و خشک گیاه در مقایسه با شاهد در انتهای مرحله رشدی به‌ترتیب تقریباً ۵۶ و ۹ درصد افزایش یافت. مطالعه وزن تر و خشک ریشه نشان داد که اعمال تیمار نور قرمز (۱۰۰ درصد)، این دو شاخص را تقریباً نزدیک به سه برابر در مقایسه با شاهد افزایش داد. کمترین وزن تر و خشک ریشه در تیمار نور آبی (۱۰۰ درصد) و پس از آن تیمار نور قرمز (۳۰ درصد) + نور آبی (۷۰ درصد) مشاهده شد. همچنین، گیاهان رشدیافته در شرایط نور قرمز (۱۰۰ درصد) در مقایسه با گیاهان رشدیافته در سایر تیمارهای نوری دارای محتوای نسبی آب برگ بیشتر و نشت الکترولیت کمتری بودند. به‌طور کلی، براساس نتایج پژوهش مشخص گردید که استفاده از نور قرمز (۱۰۰ درصد) منجر به افزایش درصد و سرعت جوانه‌زنی بذر گل جعفری گردید. علاوه‌براین، استفاده از نور قرمز در شرایط کنترل‌شده منجر به افزایش شاخص‌های رشدی گیاه در مقایسه با سایر تیمارهای آزمایش گردید. ازاین‌رو، استفاده از نور قرمز در مراحل مختلف رشدی گل جعفری در شرایط کنترل‌شده قابل توصیه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: گیاه زینتی، نور آبی، نور قرمز، نور مصنوعی

مقدمه

رشدونمو گیاه در پی تأمین انرژی به‌منظور تولید مواد آلی و به‌عنوان محرک مورفوژنتیک به نور وابسته است (Goto, 2003). نور از سه جنبه کیفیت، شدت و فتوپریود بر فرآیند رشدونمو گیاه مؤثر است (Yang *et al*., 2018). این فاکتورها در شرایط کنترل‌شده، با استفاده از نورمصنوعی قابل کنترل می‌باشد (Goto, 2003). در حال حاضر، تکنولوژی دیودهای ساطع‌کننده نور (Light-emitting diode (LED)) به‌دلیل توانایی تولید طیف‌های مختلف نوری از محبوبیت بالایی در محیط‌های کنترل‌شده برخوردار است (Bantis *et al*., 2018). این منابع نور مصنوعی به‌دلیل تولید طیف‌های با طول موج مشخص، هزینه استفاده کمتر، کاهش گرمای تابشی و طول عمر بیشتر، کاربرد بیشتری در مقایسه با سایر منابع نوری دارند (Bantis *et al*., 2018; Wang *et al*., 2021)؛ ازاین‌رو، استفاده از آن‌ها در

۱- گروه باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
۲- گروه بیوتکنولوژی گیاهان باغبانی، پژوهشکده بیوتکنولوژی صنعتی، سازمان جهاد دانشگاهی خراسان رضوی، مشهد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: hatamzadeh@guilan.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jhs.2024.89366.1370

اتاقک‌های رشد، گلخانه، سیستم کشت عمودی گیاهان و حتی پس از برداشت گیاه در مرحله ذخیره‌سازی نیز افزایش یافته است (Bantis *et al.*, 2018) و از آن‌ها با اهداف مختلفی همچون کنترل گل‌دهی در گیاهان، افزایش رشد، بهبود عملکرد و توزیع یکنواخت نور در تاج‌پوشش گیاه در کشت‌های گلخانه‌ای استفاده می‌شود (Akbarian *et al.*, 2016). کیفیت نور نقش مهمی در ظاهر گیاه و بهره‌وری گیاهان زینتی و سایر محصولات دارد (Ryu *et al.*, 2012). به‌منظور استفاده بهینه از نور، گیاهان مسیرهای سیگنالی مختلفی را در پاسخ به طول‌موج‌های مختلف نور ایجاد کرده‌اند (Rosado *et al.*, 2022). در حقیقت، تغییر در طول موج نور بر شاخص‌هایی ریخت‌شناختی، آناتومی و فیزیولوژیکی گیاه مؤثر است (Cheng *et al.*, 2022). به‌عنوان مثال، نور فروسرخ بر گل‌دهی در گیاهان روزبلند و افزایش طول میان‌گره، نور آبی در نورگرایی، باز شدن روزنه‌ها و ممانعت از رشد گیاهچه مؤثر می‌باشند (Ryu *et al.*, 2012). همچنین، نور قرمز یکی از مؤثرترین طیف‌های نوری در رشد گیاهان می‌باشد و بیشترین کارآیی را در هدایت فتوسنتز با توجه به عملکرد کوانتومی دارد (Park & Runkle, 2018). طیف نوری قرمز و آبی بیشترین کارآیی را به لحاظ فتون‌های فتوسنتزی انتشاریافته در هر وات الکتریسیته (یا کارآیی فتون فتوسنتزی در هر میکرومول) دارند (Hogewoning *et al.*, 2010; Esmaeili *et al.*, 2022). بنابراین، عموم پرورش‌دهندگان گیاهان در کشت‌های تجاری، اغلب از LEDهایی استفاده می‌کنند که نور قرمز و آبی ساطع می‌کنند (Park & Runkle, 2018). جوانه‌زنی بذر به‌عنوان یکی از فرآیندهای حیاتی و آسیب‌پذیر در توسعه گیاهان به‌شدت تحت تأثیر نور قرار می‌گیرد (Fenner & Thopson, 2005; Costa *et al.*, 2016; Goto, 2003; Kitajima & Fenner, 2000; Khayyat *et al.*, 2014). گزارش شده است که بذر و گیاهچه رشدیافته از آن قابلیت پاسخ به شدت و کیفیت‌های مختلف نور را دارا می‌باشند (Simlat *et al.*, 2016). استفاده از نور قرمز (۱۰۰ درصد) منجر به افزایش درصد سبز شدن بذر در چهار گیاه اطلسی (*Petunia* × *hybrida*)، حنا (*Impatiens balsamina*)، آهار (*Zinnia elegans*) و شاه‌پسند (*Verbena aubletia*) شد. علاوه‌براین، مشخص گردید که اضافه شدن ۲۵ درصد نور آبی به نور قرمز، افزایش کیفیت رشد دانهال را در پی داشت (Akbarian *et al.*, 2016). در پژوهش صورت‌گرفته در گیاه *Taraxacum officinale*، استفاده از LED در مقایسه با نور فلوئورسنت، جوانه‌زنی بذر را به تعویق انداخت. استفاده از نور قرمز، شاخص‌های رشدی گیاه را در مقایسه با شاهد بهبود بخشید (Ryu *et al.*, 2012). نور آبی نیز افزایش درصد جوانه‌زنی بذر، تعداد برگ در گیاه، تعداد ریشه و فراوانی روزنه و محتوای رنگدانه را در گیاه *Stevia rebaudiana* Bertoni در پی داشت (Simlat *et al.*, 2016). در گیاه *Brassica napus*، نور قرمز درصد جوانه‌زنی بذر را افزایش و در مقابل نور آبی درصد جوانه‌زنی بذر را کاهش داد. بااین‌¬حال، در شرایط گلخانه استفاده از نور آبی، طول ساقه، زیست‌توده گیاه و قطر ساقه را به‌طور معنی‌داری بهبود بخشید (Farrokh Tehrani *et al.*, 2016). استفاده از LED، امکان مطالعه فرآیندهای القاءشده توسط نور به‌خصوص فرآیندهای مورفوفیزیولوژیکی در گیاه را فراهم می‌کند (Loi *et al.*, 2021). پژوهش‌های مختلفی در این زمینه با هدف بهینه‌سازی شرایط نوری گیاه صورت گرفته است (Jian-Fei *et al.*, 2023; Ye *et al.*, 2017; Zare Mehrjerdi *et al.*, 2024). در پژوهش اکبریان و همکاران (Akbarian *et al.*, 2016) مشخص شد که استفاده از LED در بهبود کیفیت *Impatiens balsamina*، *Zinnia elegans*، *Petunia* × *hybrid* و *Verbena aubletia* مؤثر بوده است. ارتفاع گیاه در *Tagetes erecta* L. و *Salvia miltiorrhiza* Bunge به هنگام کاربرد نور آبی در مقایسه با نور قرمز و نور سفید فلوئورسنت بیشتر بود (Heo *et al.*, 2002). بااین‌¬حال، در گیاه *Rehmannia glutinosa* (Gaertn.) DC نور قرمز منجر به افزایش وزن و ارتفاع در مقایسه با سایر تیمارهای آزمایش شد (Manivannan *et al.*, 2015). گل جعفری (*Tagetes erecta* L.) متعلق به خانواده Asteraceae و گیاهی یک‌ساله است و به‌صورت زینتی، دارویی و صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. رنگدانه‌های موجود در این گل از اهمیت بالایی برخوردار است و در مقیاس صنعتی استفاده می‌شود (Jafari & Daneshvar, 2017). هدف از پژوهش صورت‌گرفته، مطالعه چگونگی تأثیر نور آبی و قرمز بر شاخص‌های جوانه‌زنی بذر و پس از آن شاخص‌های ریخت‌شناختی و فیزیولوژیکی در طی رشد بود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در آزمایشگاه بیوتکنولوژی گیاهان باغبانی در مرکز جهاد دانشگاهی خراسان رضوی اجرا شد.

تیمارهای LED

در این پژوهش، تنها از لامپ LED ساخت شرکت Chanzon در کیفیت‌های مختلف به‌عنوان منبع نوری جهت رشد گیاه استفاده گردید. تیمارها در هر دو آزمایش شامل نور سفید (۱۰۰ درصد)، نور آبی (۱۰۰ درصد)، نور قرمز (۱۰۰ درصد)، ۳۰ درصد نور آبی + ۷۰ درصد نور قرمز و ۷۰ درصد نور آبی + ۳۰ درصد نور قرمز حاصل از لامپ LED بود. میزان شار فوتون فتوسنتزی در تمام تیمارها معادل ۱۰۰ میکرومول بر مترمربع بر ثانیه حفظ شد. در این آزمایش از

دیودهای نور قرمز با طول موج در محدوده ۶۲۰ تا ۶۲۵ نانومتر، توان یک وات و ولتاژ ۲/۲ و طول موج نور آبی در محدوده ۴۶۰ تا ۴۷۰ نانومتر، توان یک وات و ولتاژ ۳/۲ استفاده گردید.

مطالعه شاخص‌های جوانه‌زنی بذر

به‌منظور مطالعه اثر کیفیت نور بر شاخص‌های جوانه‌زنی بذر، آزمایشی کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. بدین منظور، تعداد ۲۵ عدد بذر نسل F_1 گل جعفری در داخل هر پتری‌دیش در دمای ۲۵°C و فتوپریود ۱۶ ساعت روشنایی و هشت ساعت تاریکی در زیر پنل نوری تعبیه‌شده جهت اعمال تیمارها قرار داده شد. ده روز پس از کشت بذر، طول ساقه‌چه و ریشه‌چه با استفاده از خط‌کش اندازه‌گیری گردید. تعداد ریشه جانبی در دانهال شمارش شد. وزن تر ساقه‌چه و ریشه‌چه و وزن خشک آن‌ها پس از قرارگیری در آون به‌مدت ۲۴ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد با استفاده از ترازو اندازه‌گیری شد. علاوه‌براین، شاخص‌های درصد جوانه‌زنی (Khosh-Khui, 2005)، میانگین زمان لازم برای جوانه‌زنی (Falcinelli *et al.*, 2022) و سرعت جوانه‌زنی (Walker, 1990) نیز با استفاده از معادله‌های زیر محاسبه شد.

$$\text{درصد جوانه‌زنی} = \sum \frac{G}{N} \times 100 \qquad (۱)$$

$$\text{سرعت جوانه‌زنی} = \sum (F_i \times n_i) N \qquad (۲)$$

$$\text{میانگین زمان جوانه‌زنی} = \frac{\sum (ni \times Di)}{N} \qquad (۳)$$

در معادله ۱، G: تعداد بذر جوانه‌زده و N: تعداد کل بذر؛ در معادله ۲، F_i: روز شمارش، n_i، تعداد بذر جوانه‌زده در همان روز و N: کل بذرهای جوانه‌زده براساس بذر/روز و در معادله ۳، n_i: تعداد بذر جوانه‌زده در هر روز، Di: روز مربوط از شروع جوانه‌زنی بذر و N: تعداد بذر جوانه‌زده می‌باشد.

مطالعه شاخص‌های رشدی گیاه

مواد گیاهی و نحوه کشت

به‌منظور مطالعه شاخص‌های مورفوفیزیولوژیک گل جعفری (*Tagetes erecta* Antigua orange) به هنگام قرارگیری در کیفیت‌های مختلف نور، آزمایشی فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد. عامل اول کیفیت‌های مختلف نور و عامل دوم تعداد روز پس از کشت بذر بود. در تهیه بستر کشت نیز از ترکیب کوکوپیت و پرلیت به نسبت ۱:۲ استفاده شد. آبیاری گیاه با استفاده از محلول غذایی هوگلند در تمام مراحل رشد در بستر کوکوپیت پرلیت با توجه به نیاز تغذیه‌ای گیاه انجام شد. ۲۳ روز پس از کشت، گیاهچه‌ها (مرحله چهار برگ حقیقی) به بستر کشت حاوی خاک باغچه، سبوس برنج، ماسه شسته‌شده و کود دامی پوسیده به نسبت ۱:۱:۱:۵ انتقال داده شدند. گیاهان در شرایط نوری ۱۶ ساعت روشنایی و هشت ساعت تاریکی قرار داده شدند. در هر گلدان یک گیاه کشت شد. یک ماه پس از کاشت بذرها، شاخص‌های فیزیولوژیک و مورفولوژیک گیاه در فاصله زمانی ۱۵ روز یک‌بار در چهار مرحله اندازه‌گیری گردید.



شکل ۱- تیمارهای مختلف نور LED مورد استفاده در پژوهش

Figure 1- Different treatments of LED light quality used in the experiment

صفات مورد مطالعه

ارتفاع گیاه، طول میان‌گره اول، طول بزرگ‌ترین برگ و طول ریشه با استفاده از خط‌کش و قطر ساقه با استفاده از کولیس دیجیتال اندازه‌گیری شد. سطح برگ با کمک نرم‌افزار ImageJ 1.51w محاسبه گردید. تعداد گره، تعداد برگ و تعداد ریشه جانبی نیز در هر مرحله رشدی شمارش شد. نسبت وزن تر به خشک اندام هوایی و ریشه و درصد ماده خشک نیز محاسبه گردید. حجم ریشه با استفاده از استوانه مدرج و با توجه به افزایش حجم آب نسبت به حجم اولیه بر حسب سانتی‌مترمکعب اندازه‌گیری شد (Abaszadeh Faruji *et al.*, 2018). وزن تر و خشک (دمای ۷۰ °C به‌مدت ۴۸ ساعت) اندام هوایی، ریشه و گل نیز توسط ترازو توزین و ثبت گردید. صفات فیزیولوژیک شامل نشت الکترولیت، محتوای نسبی آب برگ (Abbaszadeh Faruji *et al.*, 2020) و محتوای کلروفیل برگ (Lichtenthaler & Buschmann, 2001) نیز در مراحل رشدی مختلف اندازه‌گیری شد. به‌منظور اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ، از برگ‌های تازه و پهن گیاه انتخاب و ابتدا وزن تر (FW)، پس از غوطه‌وری در آب به‌مدت ۲۴ ساعت، وزن آماس (TW) و بعد از قرارگیری در آون در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲۴ ساعت، وزن خشک (DW) اندازه‌گیری گردید. در نهایت با استفاده از معادله ۴ زیر محتوای نسبی آب برگ محاسبه شد.

$$RWC (\%) = ((FW-DW)) / (TW-DW))\times 100 \quad (۴)$$

برای اندازه‌گیری نشت الکترولیت در گیاه نیز پس از پانچ سه قطعه برگ و قرار دادن آن‌ها در داخل لوله فالکون به نمونه‌های برگی ۱۰ سی‌سی آب مقطر اضافه شد و پس از گذشت ۲۴ ساعت قرارگیری در شیکر مقدار رسانایی الکتریکی اولیه (E_1) محلول اندازه‌گیری شد. در مرحله بعد محلول حاصل به اتوکلاو منتقل و اتوکلاو گردید. پس از سرد شدن نمونه، رسانایی الکتریکی ثانویه (E_2) اندازه‌گیری شد. در انتها نشت الکترولیت توسط رابطه زیر محاسبه شد (Abaszadeh Faruji *et al.*, 2020).

$$EL (\%) = (E_{1/}\ E_2) \times 100 \quad (۵)$$

به‌منظور اندازه‌گیری محتوای کلروفیل برگ ابتدا سه قطعه از برگ پانچ شده و توسط اتانول ۹۶ درصد کاملا کوبیده شد. پس از آن عصاره به‌دست آمده به حجم ۱ سی سی رسانده شد و میکروتیوب با سرعت ۱۰ هزار دور در دقیقه سانتریفیوژ گردید. در انتها محلول شفاف بالایی توسط سه طول موج مختلف ۶۶۴، ۶۴۸ و ۴۷۰ نانومتر خوانش گردید. با استفاده از معادله‌های ۶ تا ۸ محتوای کلروفیل در گیاه محاسبه شد.

$$Cl_a = 13.36\ A_{664.1} - 519_{648.6} \quad (۶)$$

$$Cl_b = 27.43\ A_{648.6} - 8.12\ A_{664.1} \quad (۷)$$

$$C_{x+c} = (1000\ A_{470} - 2.13\ Cl_a - 97.64\ Cl_b)/209 \quad (۸)$$

آنالیز آماری

آنالیز آماری طرح توسط نرم‌افزار JMP-8 و مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

شاخص‌های جوانه‌زنی بذر

نتایج پژوهش نشان داد که تیمارهای مختلف کیفیت نور LED روی برخی ازشاخص‌های جوانه‌زنی بذر به‌طور معنی‌داری مؤثر بود ($P\leq 0.01$) (جدول ۱). مطالعه شاخص‌های جوانه‌زنی نشان داد که کمترین میانگین زمان جوانه، بیشترین سرعت جوانه‌زنی، بیشترین طول ریشه‌چه، طول ساقه‌چه، تعداد ریشه جانبی و وزن تر ریشه‌چه در تیمار نور قرمز (۱۰۰ درصد) مشاهده شد. استفاده از نور قرمز (۱۰۰ درصد) سرعت جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه، طول ساقه‌چه، تعداد ریشه جانبی و وزن تر ریشه‌چه را به‌ترتیب ۱۴ درصد، ۲۹ درصد، ۴۸ درصد، ۱۰۰ درصد و ۶۷ درصد در مقایسه با شاهد (نور سفید) بهبود بخشید (جدول ۲). در مراحل رشدونمو گیاهی، جوانه‌زنی بذر مهم‌ترین و حیاتی‌ترین مرحله رشد می‌باشد (Safari *et al.*, 2022). تغییر در کیفیت و کمیت نور بر جوانه‌زنی بذر گیاهان مؤثر است (Lone *et al.*, 2014; Anjah *et al.*, 2013). یکنواختی جوانه‌زنی بذر، یکی از شاخص‌های تأثیرگذار در تولید محصول با عملکرد و کیفیت بالا می‌باشد (Nonogaki *et al.*, 2010). فیتوکروم‌ها عامل حس کردن شرایط نوری محیط در بذرها بوده و در پاسخ بذر به نور آبی و قرمز نقش دارند (Akbarian *et al.*, 2016). به هنگام استفاده از نور آبی، شاخص‌های جوانه‌زنی بذر به دنبال تأثیر نور آبی بر عملکرد و شکل ساختاری فرم فعال فیتوکروم تحت تأثیر قرار می‌گیرند (Rashidi *et al.*, 2021). کاهش درصد جوانه‌زنی بذر به هنگام استفاده از نور آبی به دنبال غیرفعال بودن رنگدانه فیتوکروم A می‌باشد (Byun *et al.*, 2013). تأثیر منفی نور آبی در فرآیند جوانه‌زنی بذر در پژوهش‌های صورت‌گرفته توسط جکوبسن و همکاران (Jacobsen *et al.*, 2013) و تانو (Tanno, 2006) نیز گزارش شده است. تأثیر مثبت نور قرمز در جوانه‌زنی بذر به‌دلیل تحریک تولید فرم فعال فیتوکروم به‌عنوان جزء ضروری در فرآیند جوانه‌زنی بذر می‌باشد (Ortega-Base & Arechiga, 2007). رنگدانه فیتوکروم A که به‌منظور جوانه‌زنی بذر لازم و ضروری است، در طول موج ۵۵۰ تا ۷۰۰ نانومتر فعال می‌شود. به هنگام کاربرد نور قرمز و متعاقب آن طول موج مناسب، به‌منظور فعال شدن فیتوکروم A، درصد جوانه‌زنی بذر نیز افزایش می‌یابد (Byun *et al.*, 2013). علاوه‌براین، بیان شده است که نور قرمز منجر به بهبود و تسریع فرآیند جذب آب در بذر می‌شود (Zaghdoud *et al.*, 2023). در پژوهش حاضر نیز عملکرد نور قرمز در بهبود

شاخص‌های جوانه‌زنی بذر و تسریع این فرآیند در مقایسه با سایر تیمارهای نوری به‌طور معنی‌داری مؤثرتر بود. همراستا با نتایج این پژوهش، بهبود جوانه‌زنی و شاخص‌های مرتبط با جوانه‌زنی بذر تحت تأثیر نور قرمز در پژوهش رشیدی و همکاران (Rashidi *et al.*, 2021) نیز تأیید شده است.

جدول ۱- تجزیه واریانس صفات جوانه‌زنی بذر گل جعفری در کیفیت‌های مختلف نور LED

Table 1- ANOVA for seed germination traits of marigold in different LED light quality

منبع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	جوانه‌زنی بذر Seed Germination	میانگین زمان جوانه‌زنی Mean germination time	سرعت جوانه‌زنی روزانه Germination rate	طول ریشه‌چه Radicle length	طول ساقه‌چه Plumule length
کیفیت نور Light quality	4	13.6[ns]	0.09[**]	0.02[**]	0.85[**]	0.20[**]
خطا Error	10	5.60	0.011	0.002	0.097	0.006
منبع تغییرات S.O.V	**درجه آزادی df**	**تعداد ریشه جانبی lateral roots number**	**وزن تر ساقه‌چه Plumule fresh weight**	**وزن تر ریشه‌چه Radicle fresh weight**	**وزن خشک ساقه‌چه Plumule dry weight**	**وزن خشک ریشه‌چه Radicle dry weight**
کیفیت نور Light quality	4	10.3[**]	0.001[ns]	0.008[**]	0.00001[ns]	0.00000[ns]
خطا Error	10	0.84	0.003	0.0005	0.00001	0.00000

ns: عدم تفاوت معنی‌دار، *: تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد؛ **: تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد

ns: non- significant, *: significant at the 5% of probability level; **: significant at the 1% of probability level

جدول ۲- تأثیر کیفیت‌های مختلف نور LED بر شاخص‌های جوانه‌زنی بذر گل جعفری

Table 2- The effect of different LED light quality on the seed germination traits of marigold

تیمار treatment	میانگین زمان جوانه‌زنی Mean germination time	سرعت جوانه‌زنی Germination rate	طول ریشه‌چه Radicle length (cm)	طول ساقه‌چه Plumule length (cm)	تعداد ریشه جانبی lateral roots number	وزن تر ریشه‌چه Radicle fresh weight (g)
سفید (شاهد) White (control)	1.44[bc*]	0.69[b]	3.06[bc]	1.16[c]	4.65[c]	0.21[c]
قرمز (۱۰۰ درصد) Red (100%)	1.25[cd]	0.79[a]	3.95[a]	1.72[a]	9.40[a]	0.35[a]
آبی (۱۰۰ درصد) Blue (100%)	1.46[b]	0.68[b]	2.60[c]	1.45[b]	4.75[bc]	0.29[b]
قرمز (۷۰ درصد) + آبی (۳۰ درصد) Red (70%) + Blue (30%)	1.25[d]	0.80[a]	3.56[ab]	1.16[c]	6.58[b]	0.32[ab]
قرمز (۳۰ درصد) + آبی (۷۰ درصد) Red (30%) + Blue (70%)	1.68[a]	0.59[b]	3.66[a]	1.11[c]	5.24[bc]	0.28[b]

* حروف مشابه در هر ستون بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار می‌باشد (LSD test, $p \leq 0.05$).

* Similar letters in each column indicate no significant difference ($p \leq 0.05$; LSD test)

شاخص‌های مورفولوژیک

مطالعه شاخص‌های مورفولوژیک در گل جعفری نشان داد که تیمارهای مختلف نوری در طی رشد بر شاخص‌های مورد مطالعه در گیاه به‌طور معنی‌داری مؤثر بوده است ($p \leq 0.01$) (جدول ۳). نتایج پژوهش نشان داد که بیشترین ارتفاع گیاه در ابتدا و انتهای رشد مربوط به گیاهان رشدیافته در تیمار نور قرمز (۱۰۰ درصد) بوده است، به‌طوری‌که بیشترین ارتفاع گیاه در انتهای آزمایش در تیمار نور قرمز (۱۰۰ درصد) مشاهده شد (۲۱/۳ سانتی‌متر) (شکل ۲). تفاوت ارتفاع و سایر شاخص‌های مورفولوژیک گیاهان در شکل ۳ نشان داده شده است. طول میان‌گره اول در گیاهان رشدیافته در تیمار نوری ۱۰۰ درصد قرمز به‌طور قابل توجهی در مقایسه با شاهد و سایر تیمارهای آزمایش بیشتر بود (شکل ۳).

جدول ۳- تجزیه واریانس صفات مورفولوژیک گل جعفری تحت تأثیر کیفیت‌های مختلف نور LED

Table 3- ANOVA for the morphological traits of marigold in response to different light qualities of LED

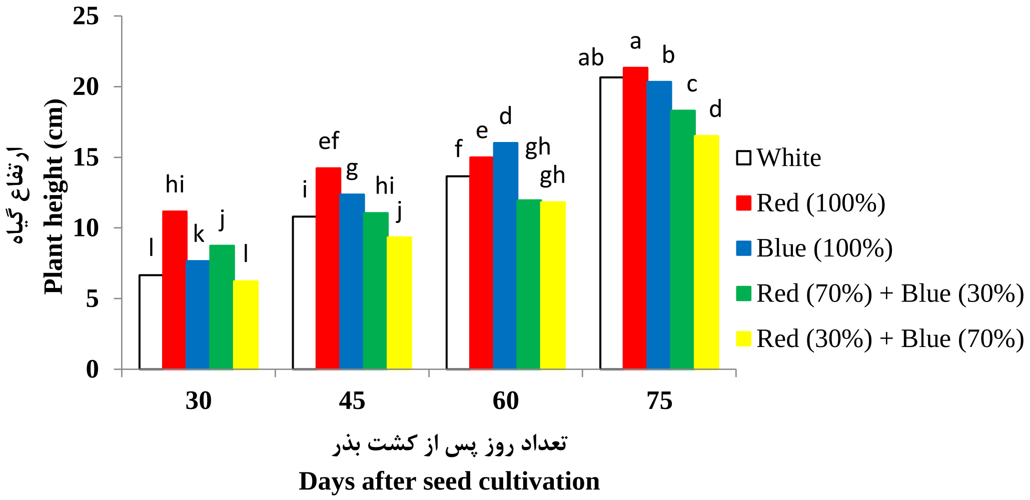
منبع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	ارتفاع گیاه Plant height	طول میان‌گره اول First internode length	قطر ساقه Stem diameter	تعداد گره Node number	سطح برگ Leaf area	طول برگ Leaf length	تعداد برگ Leaf number	تعداد ساقه جانبی Lateral shoot number
کیفیت نور Light quality (L)	4	33.7**	0.74**	1.92**	5.19**	133064**	29.6**	58.4**	2.60**
تعداد روز پس از کشت Days after cultivation (D)	3	338**	0.72**	16.8**	224**	18589**	37.7**	3153**	76.6**
کیفیت نور× تعداد روز پس از کشت L×D	12	3.33**	0.09ns	0.14**	0.84*	1557**	1.46**	48.8**	1.18**
خطا Error	40	0.345	0.05	0.06	0.36	65.7	0.14	1.75	0.18

منبع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	وزن تر اندام هوایی Shoot fresh weight	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight	نسبت وزن تر به خشک اندام هوایی Shoot fresh/ dry weight ratio	وزن تر ریشه Root fresh weight	وزن خشک ریشه Root dry weight	نسبت وزن تر به خشک ریشه Root fresh/ dry weight ratio	درصد ماده خشک Dry matter	طول ریشه Root length
کیفیت نور Light quality (L)	4	134**	0.88**	0.90ns	17.5**	0.38**	16.74**	0.90ns	27.3**
تعداد روز پس از کشت Days after cultivation (D)	3	544**	5.07**	0.76ns	24.5**	1.73**	437**	0.76ns	130**
کیفیت نور × تعداد روز پس از کشت L × D	12	15.3**	0.13**	1.11*	1.39**	0.08**	15.60**	1.11*	3.79**
خطا Error	40	0.62	0.02	0.45	0.09	0.003	2.87	0.45	0.73

ns: عدم تفاوت معنی‌دار، *: تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد؛ **: تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد

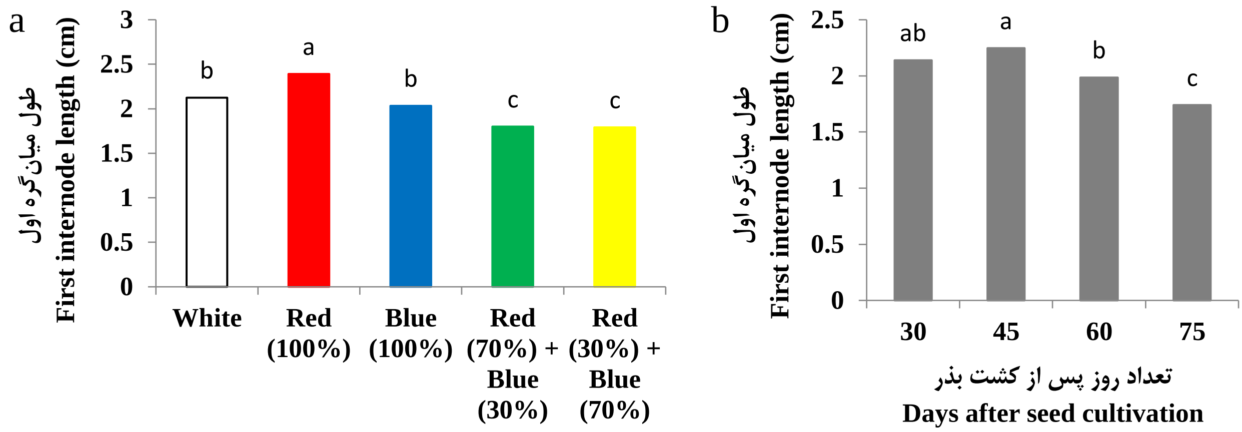
ns: non- significant, *: significant at the 5% of probability level; **: significant at the 1% of probability level

استفاده از نور قرمز (۱۰۰ درصد) در گیاه منجر به افزایش معنی‌دار شاخص‌های قطر ساقه، طول بزرگ‌ترین برگ مرکب، تعداد برگ، سطح برگ و تعداد شاخه جانبی در انتهای پژوهش در مقایسه با شاهد (نور سفید) شد (جدول ۴). نتایج پژوهش نشان داد که قطر ساقه در تمامی مراحل رشد گیاه در تیمار نور قرمز (۱۰۰ درصد) در مقایسه با شاهد به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. در انتهای پژوهش (۷۵ روز پس از کشت بذر) قطر ساقه در نور قرمز (۱۰۰ درصد) در مقایسه با تیمار نور سفید در همان مرحله رشدی بیشتر از ۳۷ درصد افزایش یافت و منجر به ثبت بیشترین قطر ساقه در گیاه شد (جدول ۴). اعمال نور ترکیبی در درصدهای مختلف، در تمامی مراحل رشدی منجر به کاهش تعداد گره در مقایسه با شاهد گردید. در انتهای مرحله رشدی گیاه، بیشترین تعداد گره در شاهد و پس از آن در تیمار نور قرمز (۱۰۰ درصد) مشاهده گردید. در انتهای مرحله رشدی (۷۵ روز پس از کشت بذر)، اعمال نور قرمز (۱۰۰ درصد) در گل جعفری طول بزرگ‌ترین برگ مرکب، تعداد برگ و تعداد شاخه جانبی را در مقایسه با شاهد در همان مرحله رشدی به‌ترتیب تقریباً ۶ درصد، ۳۳ درصد و ۳۱ درصد افزایش داد (جدول ۴). بیشترین درصد ماده خشک نیز در تیمار ۱۰۰ درصد نور آبی ۶۰ روز بعد از کشت بذر مشاهده شد. با رشد گیاه و افزایش تعداد روز از زمان کشت بذر، درصد ماده خشک گیاه در نور قرمز ۱۰۰ درصد کاهش یافت (جدول ۴).



شکل ۲- تأثیر کیفیت‌های مختلف نور LED بر ارتفاع گیاه گل جعفری در طی رشد

Figure 2- The effect of LED light quality on the plant height of marigold during the plant growth (LSD, *p≤0.05*)



شکل ۳- تأثیر کیفیت‌های مختلف نور LED (a) و تعداد روز پس از کشت (b) بر طول میان‌گره اول در گیاه گل جعفری

Figure 3- The effect of LED light quality (a) and days after planting (b) on the first internode length of marigold (LSD, *p≤0.05*)

در گل جعفری، اعمال نور قرمز به‌تنهایی منجر به افزایش معنی‌دار وزن تر و خشک اندام هوایی، طول ریشه و وزن تر و خشک ریشه در تمامی مراحل رشد در مقایسه با شاهد و سایر تیمارهای پژوهش گردید (جدول ۵) (شکل ۴). در انتهای مرحله رشدی گیاه، استفاده از نور قرمز (۱۰۰ درصد)، وزن تر و خشک گیاه را در مقایسه با شاهد در همان مرحله رشدی به‌ترتیب تقریباً ۵۶ درصد و ۹ درصد افزایش داد (جدول ۵). طول ریشه، در گیاه نیز در انتهای مرحله رشدی ۳۹ درصد در مقایسه با شاهد در همان مرحله رشدی افزایش یافت. قابل ذکر است که در دو دوره انتهایی مرحله رشدی (۶۰ و ۷۵ روز پس از کشت بذر)، تمامی تیمارهای نوری منجر به افزایش معنی‌دار رشد ریشه در مقایسه با شاهد در همان مرحله رشدی شدند (جدول ۵). در مرحله رشدی ۷۵ روز پس از کشت بذر، مطالعه وزن تر و خشک ریشه نشان داد که اعمال تیمار نور قرمز (۱۰۰ درصد) این دو شاخص را تقریباً نزدیک به سه برابر در مقایسه با شاهد افزایش داد. کمترین وزن تر و خشک ریشه در تیمار نور آبی (۱۰۰ درصد) و پس از آن تیمار نور قرمز (۳۰ درصد) + نور آبی (۷۰ درصد) مشاهده شد (جدول ۵). استفاده از نور قرمز ۱۰۰ درصد منجر به افزایش نسبت وزن تر به خشک اندام هوایی و کاهش نسبت وزن تر به خشک ریشه گردید (جدول ۵).

جدول ٤- تأثیر کیفیت‌های مختلف نور LED در طی رشد بر برخی از صفات مورفولوژیک گیاه گل جعفری

Table 4- The effect of different LED light quality on some plant morphological traits of marigold

کیفیت نور Light quality	تعداد روز پس از کشت Days after planting	قطر ساقه Stem diameter (mm)	تعداد گره Node number	طول بزرگ‌ترین برگ Leaf length (cm)	تعداد برگ Leaf number	تعداد شاخه جانبی Shoot lateral number	سطح برگ Leaf area (cm^2)	درصد ماده خشک Dry matter (%)
سفید White (control)		2.24^{gh*}	4.00^{k}	6.96^{j}	5.66^{l}	0.00^{g}	57.0^{k}	9.33^{bcd}
قرمز (۱۰۰ درصد) Red (100%)		3.04^{ef}	5.33^{i}	10.76^{de}	8.00^{k}	0.00^{g}	108^{hi}	9.08^{bcd}
آبی (۱۰۰ درصد) Blue (100%)	30	2.39^{gh}	5.33^{i}	6.93^{j}	7.66^{kl}	0.00^{g}	55.1^{k}	9.30^{bcd}
قرمز (۷۰ درصد) + آبی (۳۰ درصد) Red (70%)+Blue (30%)		2.50^{g}	5.00^{ij}	8.63^{i}	8.33^{k}	0.00^{g}	92.8^{j}	9.99^{abc}
قرمز (۳۰ درصد) + آبی (۷۰ درصد) Red (30%) + Blue (70%)		2.06^{h}	4.33^{jk}	6.93^{j}	8.00^{k}	0.00^{g}	103^{ij}	8.98^{cde}
سفید White (control)		2.97^{f}	8.00^{g}	11.00^{d}	14.00^{ij}	0.00^{g}	98.7^{ij}	8.81^{de}
قرمز (۱۰۰ درصد) Red (100%)		3.66^{d}	8.00^{g}	12.83^{bc}	15.66^{hi}	0.00^{g}	183^{f}	10.08^{abc}
آبی (۱۰۰ درصد) Blue (100%)	45	3.42^{de}	8.00^{g}	9.23^{ghi}	16.66^{gh}	0.33^{g}	104^{ij}	9.98^{abc}
قرمز (۷۰ درصد) + آبی (۳۰ درصد) Red (70%) + Blue (30%)		3.30^{def}	6.33^{h}	9.26^{gh}	13.66^{ij}	0.00^{g}	120^{h}	9.53^{a-d}
قرمز (۳۰ درصد) + آبی (۷۰ درصد) Red (30%) + Blue (70%)		3.26^{def}	6.33^{h}	9.73^{hi}	13.00^{j}	0.00^{g}	45.2^{k}	9.20^{bcd}
سفید White (control)		4.13^{c}	12.6^{bcd}	12.43^{c}	20.66^{e}	3.33^{ef}	226^{d}	9.82^{a-d}
قرمز (۱۰۰ درصد) Red (100%)		5.01^{b}	13.0^{bc}	12.23^{ab}	19.33^{ef}	5.33^{ab}	284^{b}	9.80^{a-d}
آبی (۱۰۰ درصد) Blue (100%)	60	4.15^{c}	12.3^{cd}	9.73^{fg}	19.33^{ef}	3.33^{ef}	161^{g}	10.56^{a}
قرمز (۷۰ درصد) + آبی (۳۰ درصد) Red (70%) + Blue (30%)		4.45^{c}	11.3^{ef}	10.70^{de}	18.66^{efg}	2.66^{f}	210^{e}	9.62^{a-d}
قرمز (۳۰ درصد) + آبی (۷۰ درصد) Red (30%) + Blue (70%)		4.09^{c}	11.0^{f}	9.56^{fg}	17.33^{fgh}	2.66^{f}	157^{g}	9.53^{a-d}
سفید White (control)		4.21^{c}	14.0^{a}	13.03^{bc}	41.00^{b}	4.33^{cd}	276^{b}	9.74^{a-d}
قرمز (۱۰۰ درصد) Red (100%)		5.78^{a}	13.3^{ab}	13.83^{a}	54.33^{a}	5.66^{a}	345^{a}	7.91^{e}
آبی (۱۰۰ درصد) Blue (100%)	75	4.47^{c}	13.0^{bc}	10.16^{ef}	33.66^{d}	3.66^{de}	210^{e}	9.90^{a-d}
قرمز (۷۰ درصد) + آبی (۳۰ درصد) Red (70%) + Blue (30%)		5.18^{b}	12.3^{cd}	11.06^{d}	40.33^{b}	4.66^{bc}	332^{a}	9.62^{a-d}
قرمز (۳۰ درصد) + آبی (۷۰ درصد) Red (30%) + Blue (70%)		4.37^{c}	$12.0d^{e}$	10.06^{f}	36.33^{c}	3.33^{ef}	260^{c}	10.18^{ab}

* حروف مشابه در هر ستون بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار می‌باشد (LSD test, $p\leq0.05$).

* Similar letters in each column indicate no significant difference ($p\leq0.05$; LSD test)

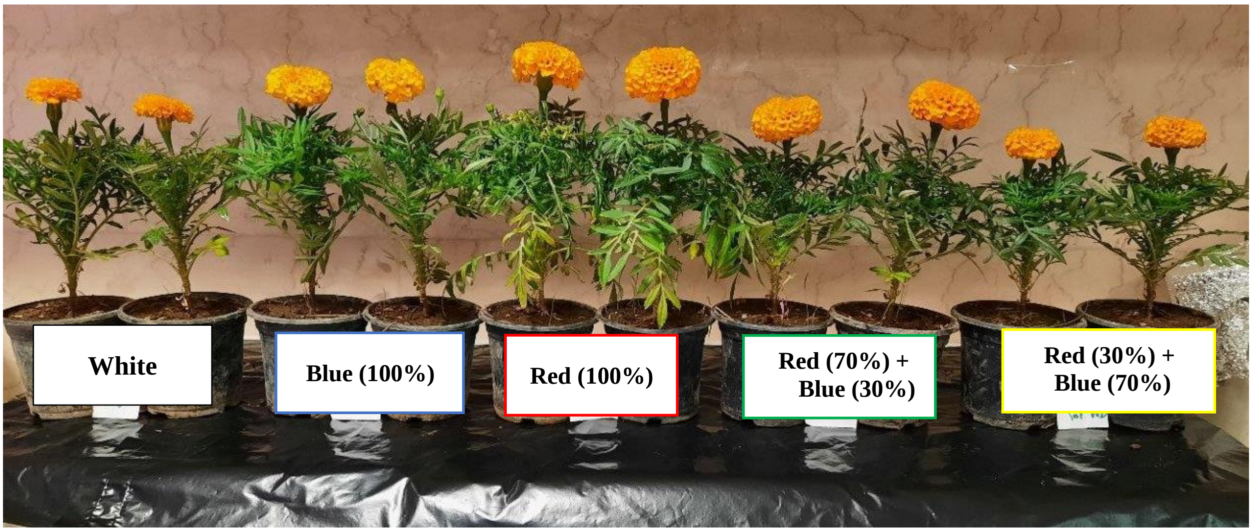
جدول ۵- تأثیر کیفیت‌های مختلف نور LED در طی رشد بر وزن تر و خشک اندام هوایی، طول ریشه و وزن تر و خشک ریشه گیاه گل جعفری

Figure 5- The effect of different LED light quality on the shoot fresh and dry weight, root length and root fresh and dry weight of marigold

کیفیت نور Light quality	تعداد روز پس از کشت Days after planting	وزن تر اندام هوایی Shoot fresh weight (g)	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight (g)	طول ریشه Root length (cm)	وزن تر ریشه Root fresh weight (g)	وزن خشک ریشه Root dry weight (g)	نسبت وزن تر به خشک اندام هوایی Shoot fresh/ dry weight ratio	نسبت وزن تر به خشک ریشه Root fresh/ dry weight ratio
سفید White (control)	30	2.70^{k*}	0.25^{hi}	7.86^{k}	1.18^{lm}	0.12^{kl}	90.66^{bcd}	89.73^{a-d}
قرمز (۱۰۰ درصد) Red (100%)		5.25^{ij}	0.47^{gh}	9.36^{j}	2.36^{ij}	0.24^{hij}	90.91^{bcd}	89.40^{bcd}
آبی (۱۰۰ درصد) Blue (100%)		2.59^{k}	0.24^{hi}	6.40^{l}	0.96^{m}	0.075^{l}	90.79^{bcd}	92.15^{ab}
قرمز (۷۰ درصد) + آبی (۳۰ درصد) Red (70%)+Blue (30%)		4.38^{j}	0.44^{ghi}	7.06^{kl}	1.91^{jk}	0.17^{jk}	90.00^{cde}	90.62^{a-d}
قرمز (۳۰ درصد) + آبی (۷۰ درصد) Red (30%)+Blue (70%)		2.40^{k}	0.21^{i}	7.00^{kl}	0.91^{m}	0.068^{l}	91.01^{abc}	92.46^{a}
سفید White (control)	45	5.06^{ij}	0.44^{ghi}	10.83^{hi}	1.55^{kl}	0.16^{jkl}	91.18^{ab}	89.73^{a-d}
قرمز (۱۰۰ درصد) Red (100%)		9.70^{g}	0.97^{de}	13.73^{def}	3.96^{d}	0.42^{f}	89.91^{cde}	89.33^{cd}
آبی (۱۰۰ درصد) Blue (100%)		4.55^{ij}	0.52^{fg}	13.26^{ef}	2.38^{hij}	0.33^{fgh}	90.01^{cde}	88.04^{d}
قرمز (۷۰ درصد) + آبی (۳۰ درصد) Red (70%)+Blue (30%)		5.78^{i}	0.55^{fg}	9.63^{ij}	2.54^{ghi}	0.25^{ghi}	90.46^{b-e}	89.83^{a-d}
قرمز (۳۰ درصد) + آبی (۷۰ درصد) Red (30%)+Blue (70%)		5.15^{ij}	0.47^{gh}	9.63^{ij}	1.92^{jk}	0.16^{jkl}	90.79^{bcd}	91.62^{abc}
سفید White (control)	60	12.15^{e}	1.19^{cd}	10.90^{hi}	2.68^{ghi}	0.28^{hi}	90.17^{b-e}	89.30^{cd}
قرمز (۱۰۰ درصد) Red (100%)		20.19^{b}	1.98^{a}	15.33^{abc}	6.40^{b}	0.66^{d}	90.19^{b-e}	89.70^{a-d}
آبی (۱۰۰ درصد) Blue (100%)		9.46^{g}	1.00^{d}	14.83^{bcd}	3.22^{ef}	0.39^{fg}	89.43^{e}	87.86^{d}
قرمز (۷۰ درصد) + آبی (۳۰ درصد) Red (70%)+Blue (30%)		10.57^{fg}	1.02^{cd}	11.76^{gh}	2.89^{fgh}	0.31^{gh}	90.37^{b-e}	89.25^{cd}
قرمز (۳۰ درصد) + آبی (۷۰ درصد) Red (30%)+Blue (70%)		7.73^{h}	0.73^{ef}	12.83^{fg}	2.18^{ij}	0.19^{ijk}	90.46^{b-e}	91.17^{abc}
سفید White (control)	75	16.44^{d}	1.87^{ab}	11.76^{gh}	2.92^{fg}	0.76^{c}	90.25^{b-e}	73.77^{g}
قرمز (۱۰۰ درصد) Red (100%)		25.67^{a}	2.03^{a}	16.33^{a}	7.20^{a}	1.55^{a}	92.08^{a}	78.46^{f}
آبی (۱۰۰ درصد) Blue (100%)		11.86^{ef}	1.17^{cd}	16.16^{ab}	3.57^{de}	0.53^{e}	90.09^{b-e}	85.02^{e}
قرمز (۷۰ درصد) + آبی (۳۰ درصد) Red (70%)+Blue (30%)		17.88^{c}	1.72^{b}	12.83^{fg}	5.23^{c}	1.04^{b}	90.37^{b-e}	80.14^{f}
قرمز (۳۰ درصد) + آبی (۷۰ درصد) Red (30%)+Blue (70%)		12.46^{e}	1.26^{c}	14.43^{cde}	3.24^{ef}	0.66^{d}	89.81^{de}	79.08^{f}

* حروف مشابه در هر ستون بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار می‌باشد (LSD test, $p≤0.05$).

* Similar letters in each column indicate no significant difference ($p≤0.05$; LSD test)



شکل ٤- تأثیر کیفیت‌های مختلف نور LED بر رشد گیاه گل جعفری
Figure 4- The effect of LED light quality on the growth of marigold

نور نقش قابل توجهی در مراحل مختلف رشد گیاهی دارد. ازاین‌رو، اخیراً پژوهش‌های متفاوتی در ارتباط با تأثیر کیفیت‌های مختلف نور بر رشدونمو گیاه صورت گرفته است (Ye *et al*., 2017). مطالعات مختلفی نشان داده است که گونه‌های گیاهی پاسخ‌های متفاوتی به هنگام قرارگیری در شرایط نور LED نشان می‌دهند و دامنه وسیعی از تغییرات مورفولوژیک و فیزیولوژیک در آن‌ها دیده شده است (Dong *et al*., 2014; Manivannan *et al*., 2015). در پژوهش صورت‌گرفته مشخص گردید که استفاده از نور قرمز در گیاه *Tagetes erecta* Antigua orange منجر به بهبود شاخص‌های رشدی در مقایسه با نور سفید، آبی و ترکیب نور آبی و قرمز شده است. استفاده از نور قرمز (۱۰۰ درصد) ارتفاع و طول میان‌گره اول گیاه را در مقایسه با سایر تیمارهای آزمایش افزایش داد. همراستا با نتایج این پژوهش، افزایش ارتفاع گیاه تحت تأثیر نور قرمز در سایر پژوهش‌ها نیز گزارش شده است (Ryu *et al*., 2012; Manivannan *et al*., 2015). استفاده از نور قرمز منجر به افزایش محتوای فیتوکروم برگ شده که در پی آن، تقسیم سلولی و توسعه سلول نیز افزایش می‌یابد (Neff *et al*., 2000). این فرآیند در افزایش طول و سطح برگ گیاه مؤثر است. همچنین، اندازه برگ بر سرعت فرآیند فتوسنتز در گیاه مؤثر می‌باشد، چراکه برگ‌های بزرگ‌تر منجر به جذب نور بیشتر و در نهایت تسهیل فرآیند فتوسنتز و تولید انرژی بیشتر می‌شوند. علاوه‌براین، تبادلات گازی در برگ‌ها با سطح برگ بیشتر تسهیل می‌شود که این موضوع در افزایش جذب کربن دی اکسید که عامل اصلی در فرآیند فتوسنتز می‌باشد، مؤثر است (Lin *et al*., 2013). بهبود فرآیند فتوسنتز و تولید ترکیبات فتوسنتزی بیشتر، بهبود شاخص‌های رشدی و در نهایت بهبود رشد گیاه را در پی دارد. قطر ساقه پس از انتقال گیاهچه یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار در حفظ بقاء گیاه می‌باشد (Akbarian *et al*., 2016). در پژوهش حاضر، اعمال نور قرمز (۱۰۰ درصد) منجر به افزایش معنی‌دار قطر ساقه در گیاه شد. ازاین‌رو گیاه شرایط استقرار اولیه مناسب‌تری را تجربه کرده استکه این موضوع خود در افزایش رشد گیاه مؤثر می‌باشد. علاوه‌براین، مشخص گردید که وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه نیز در نور قرمز (۱۰۰ درصد) بیشترین مقدار را داشته است. افزایش وزن تر و خشک اندام‌هوایی تحت تأثیر نور قرمز، به دنبال بهبود سایر شاخص‌های رشدی در گیاه و تولید گیاهان بزرگ‌تر ارتباط دارد. نتایج مشابهی در سایر پژوهش‌ها نیز گزارش شده است (Akbarian *et al*., 2016; Wollaeger & Runkle, 2014). در پژوهش Sadat Seyedi و همکاران نیز مشخص گردید که استفاده از نور قرمز در مقایسه با نور سفید منجر به افزایش معنی‌دار سطح برگ، تعداد ساقه جانبی و وزن خشک گیاه *Thymus vulgaris* L. شده است (Sadat Seyedi *et al*., 2023). نتایج مشابهی مبنی بر افزایش شاخص‌های رشدی همچون زیست توده گیاهی، ارتفاع گیاه، تعداد برگ و قطر ساقه تحت تأثیر استفاده از نور قرمز در گیاه *Boehmeria nivea* L. مشاهده شد (Rehman *et al*., 2020). در سایر پژوهش‌ها نیز بهبود شاخص‌های رشدی گیاه تحت تأثیر نور قرمز گزارش شده است (Saleem *et al*., 2019; Dong *et al*., 2014). محققان بیان داشته‌اند که نور قرمز به‌واسطه فیتوکروم‌ها در بهبود مورفوژنز برگ، توسعه سیستم فتوسنتزی (Kurepin *et al*., 2007) و تجمع کربوهیدارت محلول نقش دارد (Kurepin *et al*., 2007; Zhang *et al*., 2008).

صفات فیزیولوژیک

مطالعه صفات فیزیولوژیک در گیاه نشان داد که اعمال تیمارهای نوری بر نشت الکترولیت، محتوای نسبی آب برگ و محتوای کلروفیل برگ در طی رشد گیاه مؤثر بود (P≤0.01) (جدول ۶). بدین صورت که اعمال تنش نوری قرمز (۱۰۰ درصد) منجر به کاهش نشت الکترولیت در مقایسه با شاهد در هر مرحله از رشد گردید (جدول ۷). محتوای نسبی آب برگ در گیاه نشان داد که گیاهان رشدیافته در تیمارهای نوری مختلف، محتوای نسبی آب برگ در گیاه را در مقایسه با شاهد در تمامی مراحل رشد افزایش داد. در انتهای پژوهش (۷۵ روز پس از کشت بذر)، اعمال تیمار نور قرمز (۱۰۰ درصد)، محتوای نسبی آب برگ را در مقایسه با شاهد ۱۲ درصد افزایش داد (جدول ۷). مطالعه محتوای کلروفیل a در گیاه نشان داد که در انتهای رشد گیاه، محتوای کلروفیل a در تمامی تیمارهای آزمایش به‌غیر از نور قرمز کاهش یافت. محتوای کلروفیل a در برگ گیاهان رشدیافته در نور قرمز تفاوت معنی‌داری با شاهد نداشت (جدول ۷). نتایج پژوهش نشان داد که در مرحله انتهایی رشد (۷۵ روز پس از کشت بذر)، محتوای کلروفیل b در تیمار نور قرمز (۱۰۰ درصد)، نور آبی (۱۰۰ درصد)، نور قرمز (۷۰ درصد) + نور آبی (۳۰ درصد) و نور قرمز (۳۰ درصد) + نور آبی (۷۰ درصد) در مقایسه با شاهد به‌ترتیب تقریباً ۵۰ درصد، ۷۹ درصد، ۴۱ درصد و ۱۴۶ درصد افزایش یافت (جدول ۷). نتایج مشابهی در ارتباط با محتوای کاروتنوئید برگ مشاهده گردید. بدین صورت که بیشترین مقدار آن در تیمار نور قرمز (۳۰ درصد) + نور آبی (۷۰ درصد) ثبت گردید (جدول ۷). بیشترین محتوای کلروفیل کل برگ نیز در تیمار نور قرمز (۳۰ درصد) + نور آبی (۷۰ درصد) بود (جدول ۷). کلروفیل، مهم‌ترین رنگدانه گیاهی در گیاهان عالی می‌باشد. این رنگدانه در به دام انداختن نور به‌منظور فتوسنتز و تبدیل انرژی نورانی به انرژی شیمیایی نقش دارد. کیفیت نور با توجه به تأثیر بر محتوای کلروفیل و ترکیب آن به‌طور مستقیم بر میزان فتوسنتز در گیاه نقش دارد (Ye *et al.*, 2017). گزارش شده است که نور قرمز و آبی در القاء باز شدن روزنه‌های برگ گیاه و افزایش جذب کربن دی اکسید توسط برگ مؤثر می‌باشند (Wang *et al.*, 2021). در پژوهش حاضر، محتوای کلروفیل در ابتدای رشد در شاهد در مقایسه با تیمارهای نوری بیشتر بود. نتایج مشابهی توسط داورزنی و همکاران (Davarzani *et al.*, 2023) در گل رز مشاهده شد. علاوه‌براین، نتایج پژوهش نشان داد که نور آبی در افزایش محتوای کلروفیل برگ در مقایسه با نور قرمز عملکرد بهتری در مقایسه با سایر تیمارهای آزمایش نشان داد. نور آبی منجر به تحریک کریپتوکروم که در افزایش بیان ژن در سنتز کلروفیل مؤثر است، می‌شود (Li & Kubota, 2009). افزایش محتوای کلروفیل برگ تحت تأثیر نورآبی در انگور، پنبه و نخودفرنگی نیز گزارش شده است (Wu *et al.*, 2007; Poudel *Et Al.*, 2008; Li *et al.*, 2010). در گیاه کاهو، محتوای کلروفیل برگ در گیاهان رشدیافته در شرایط نور آبی، ۱۱ درصد نسبت به محتوای کلروفیل برگ در گیاهان نور قرمز بیشتر بود (Johkan *et al.*, 2010). علاوه‌براین در گیاه خیار نیز افزایش درصد نور آبی در مقایسه با نور قرمز منجر به افزایش محتوای کلروفیل برگ در گیاه شد (Hogewoning *et al.*, 2010). در پژوهش دیگری گزارش شده است که در گیاه کاهو (Kobayashi *et al.*, 2013) و ماهون چینی (*Toona sinensis* (Juss.)) (Zhang *et al.*, 2010) محتوای کلروفیل برگ در گیاهان رشدیافته در شرایط نور آبی از گیاهان رشدیافته در شرایط نور قرمز بیشتر بود.

جدول ٦- تجزیه واریانس صفات فیزیولوژیک گل جعفری تحت تأثیر کیفیت‌های مختلف نور LED

Table 3- ANOVA for the physiological traits of marigold in response to different light qualities of LED

منبع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	نشت الکترولیت EL	محتوای آب نسبی برگ RWC	کلروفیل a Cl a	کلروفیل b Cl b	کلروفیل کل Total chlorophyll	کاروتنوئید Carotenoid
کیفیت نور Light quality (L)	4	202**	36.9**	28.5**	8.82**	56.6**	1.30**
تعداد روز پس از کشت Days after cultivation (D)	3	565**	54.8**	202**	98.0**	530**	22.3**
L×D	12	46.8**	16.7**	22.5**	15.4**	54.5**	2.74**
خطا Error	40	11.7	2.87	1.09	1.51	2.31	0.31

ns: عدم تفاوت معنی‌دار، *: تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد؛ **: تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد

ns: non- significant, *: significant at the 5% of probability level; **: significant at the 1% of probability level.

جدول ۷- تأثیر کیفیت‌های مختلف نور LED در طی رشد بر نشت الکترولیت و محتوای نسبی آب برگ گیاه گل جعفری

Table 6- The effect of the different LED light quality on the electrolyte leakage and RWC of marigold

کیفیت نور Light quality	تعداد روز پس از کشت Days after planting	نشت الکترولیت Electrolyte leakage (%)	محتوای نسبی آب برگ RWC (%)	کلروفیل a Cl a ($mg.g^{-1}$ FW)	کلروفیل b Cl b ($mg.g^{-1}$ FW)	کاروتنوئید Carotenoid ($mg.g^{-1}FW$)	کلروفیل کل Total chlorophyll ($mg.g^{-1}FW$)
سفید (شاهد) White (control)		24.38^{ghi}	78.33^{ghi}	14.98^{f}	4.84^{gh-k}	3.63^{ghi}	19.82^{jk}
قرمز (۱۰۰ درصد) Red (100%)		18.62^{j}	79.56^{fgh}	13.18^{gh}	4.24^{ijk}	3.41^{hi}	17.43^{kl}
آبی (۱۰۰ درصد) Blue (100%)	30	24.96^{f-i}	71.97^{k}	9.44^{j}	3.02^{k}	2.33^{j}	12.46^{n}
قرمز (۷۰ درصد) + آبی (۳۰ درصد) Red (70%) + Blue (30%)		26.39^{e-i}	69.82^{k}	13.37^{fg}	4.12^{ijk}	3.36^{hi}	17.49^{kl}
قرمز (۳۰ درصد) + آبی (۷۰ درصد) Red (30%) + Blue (70%)		24.55^{f-i}	78.28^{ghi}	11.53^{hi}	3.71^{jk}	2.98^{ij}	15.25^{lm}
سفید (شاهد) White (control)		32.32^{bcd}	76.99^{hij}	17.56^{de}	5.61^{f-j}	5.24^{de}	23.17^{hi}
قرمز (۱۰۰ درصد) Red (100%)		20.74^{ij}	92.84^{a}	17.13^{e}	3.19^{k}	3.67^{ghi}	14.32^{mn}
آبی (۱۰۰ درصد) Blue (100%)	45	26.25^{e-i}	80.30^{efg}	11.13^{b}	4.66^{h-k}	4.46^{efg}	21.80^{ij}
قرمز (۷۰ درصد) + آبی (۳۰ درصد) Red (70%) + Blue (30%)		28.43^{d-g}	86.98^{b}	21.82^{b}	6.73^{efg}	5.35^{de}	28.55^{cde}
قرمز (۳۰ درصد) + آبی (۷۰ درصد) Red (30%) + Blue (70%)		30.20^{def}	79.70^{e-h}	18.26^{de}	5.73^{f-j}	5.03^{def}	24.00^{ghi}
سفید (شاهد) White (control)		25.25^{f-i}	82.42^{cde}	25.89^{a}	11.64^{b}	4.87^{def}	37.53^{a}
قرمز (۱۰۰ درصد) Red (100%)		24.41^{ghi}	84.69^{bc}	17.91^{de}	5.87^{f-i}	3.74^{ghi}	23.78^{ghi}
آبی (۱۰۰ درصد) Blue (100%)	60	22.55^{hig}	81.33^{def}	20.35^{bc}	6.32^{fgh}	4.25^{fgh}	26.68^{ef}
قرمز (۷۰ درصد) + آبی (۳۰ درصد) Red (70%) + Blue (30%)		31.24^{cde}	79.39^{fgh}	18.63^{cde}	6.63^{e-h}	3.77^{ghi}	25.27^{fgh}
قرمز (۳۰ درصد) + آبی (۷۰ درصد) Red (30%) + Blue (70%)		37.08^{b}	76.00^{ij}	21.63^{b}	7.09^{def}	4.18^{fgh}	28.73^{cde}
سفید (شاهد) White (control)		44.98^{a}	74.99^{j}	21.09^{b}	5.97^{f-i}	5.55^{bcd}	27.06^{def}
قرمز (۱۰۰ درصد) Red (100%)		27.87^{d-h}	83.93^{cd}	21.32^{b}	8.96^{cd}	5.38^{cde}	30.29^{c}
آبی (۱۰۰ درصد) Blue (100%)	75	37.23^{b}	81.70^{def}	18.78^{cde}	10.68^{bc}	6.28^{abc}	29.46^{cd}
قرمز (۷۰ درصد) + آبی (۳۰ درصد) Red (70%) + Blue (30%)		44.67^{a}	81.80^{def}	17.33^{de}	8.40^{de}	6.32^{ab}	25.74^{fg}
قرمز (۳۰ درصد) + آبی (۷۰ درصد) Red (30%) + Blue (70%)		36.00^{bc}	79.48^{fgh}	19.02^{cd}	14.75^{a}	6.78^{a}	33.78^{b}

* حروف مشابه در هر ستون بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار می‌باشد (LSD test, $p \leq 0.05$).

* Similar letters in each column indicate no significant difference ($p \leq 0.05$; LSD test)

نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش نشان داد که استفاده از دیودهای ساطع‌کننده نور با کیفیت‌های مختلف نور در گیاه *Tagetes erecta* Antigua orange منجر به بهبود شرایط رشدی گیاه شده است. مقایسه بین تیمارهای نوری نشان داد که استفاده از نور قرمز (۱۰۰ درصد) منجر به افزایش درصد و سرعت جوانه‌زنی بذر گل جعفری گردید. علاوه‌براین، استفاده از نور قرمز در شرایط کنترل‌شده منجر به افزایش شاخص‌های رشدی گیاه در مقایسه با سایر تیمارهای آزمایش گردید. ازاین‌رو، استفاده از نور قرمز در مراحل مختلف رشدی گل جعفری در شرایط کنترل‌شده قابل توصیه می‌باشد.

References

1. Abaszadeh Faruji, R., Shoor, M., Tehranifar, A., Abedy, B., & Safari, N. (2018). Effects of humic acid and fulvic acid on some morphological characteristics of geranium. *Journal of Horticultural Science*, *32*(1), 35-50. (In Persian). https://doi.org/10.22067/jhorts4.v31i3.57849
2. Abaszadeh Faruji, R., Shoor, M., Tehranifar, A., & Abedi, B. (2020). Effects of humic and fulvic acids on some physiological characteristics of two ornamental plants of granium (*Plargonium* spp.) and scindapsus (*Scindapsus* spp.). *Journal of Soil and Plant Interactions (Isfahan University of Technology)*, 11(1), 45-58. (In Persian). https://doi.org/10.47176/jspi.11.1.18081
3. Akbarian, B., Matloobi, M., & Mahna, N. (2016). Effects of LED light on seed emergence and seedling quality of four bedding flowers. *Journal of Ornamental Plants*, *6*(2), 115-123. (in Persian). http://jornamental.iaurasht.ac.ir/article_523303_8d31800750be3ad79e266905880f2f8.pdf
4. Anjah,G.M., Focho, A.D., & Dondjang, J.P. (2013) The effects of sowing depth and light intensity on 1 the germination and early growth of *Ricinodendron heudelotii*. *African Journal of Agricultural 2 Research*, *8*(46), 5854-5858. https://doi.org/ 10.5897/AJAR12.066
5. Bantis, F., Smirnakou, S., Ouzounis, T., Koukounaras, A., Ntagkas, N., & Radoglou, K. (2018). Current status and recent achievements in the field of horticulture with the use of light-emitting diodes (LEDs). *Scientia Horticulturae*, *235*, 437–451.
6. Byun, A., Mao, M., & Sidhu, R. (2013). The effect of different wavelengths on the germination time of *Arabidopsis thaliana* wild type and mutant type seeds. The Expedition, 3.
7. Cheng, X., Wang, R., Liu, X., Zhou, L., Dong, M., Rehman, M., Fahad, S., Liu, L., & Deng, G. (2022). Effects of light spectra on morphology, gaseous exchange, and antioxidant capacity of industrial hemp. *Frontiers in Plant Science*, *13*, 937436. https://doi.org/ 10.3389/fpls.2022.937436
8. Costa, A., Dias, A.S., Grenho, M.G., & Dias, L.S. (2016). Effects of dark or of red, blue or white light on germination of subterranean clover seeds. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, *28*(12), 853-864. https://doi.org/10.9755/ejfa.2016-06-774
9. Davarzani, M., Aliniaeifard, S., Zare Mehrjerdi, M., Roozban, M.R., Saeedi, S.A., & Gruda, N.S. (2023) Optimizing supplemental light spectrum improves growth and yield of cut roses. *Scientific Reports*, *13*, 21381. https://doi.org/10.1038/s41598-023-48266-3
10. Dong C., Fu Y., Liu G., & Liu, H. (2014). Growth, photosynthetic characteristics, antioxidant capacity and biomass yield and quality of wheat (*Triticum aestivum* L.) exposed to LED light sources with different spectra combinations. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *200*, 219-230. https://doi.org/10.1111/jac.12059
11. Esmaeili, S., Aliniaeifard, S., Dianati Daylami, S., Karimi, S., Shomali, A., Didaran, F., Telesiński, A., Sierka, E., & Kalaji, H.M. (2022). Elevated light intensity compensates for nitrogen deficiency during chrysanthemum growth by improving water and nitrogen use efficiency. *Scientific Reports*, *12*(1), 10002. https://doi.org/10.1038/s41598-022-14163-4
12. Falcinelli, B., Galieni, A., Tosti, G., Stagnari, F., Trasmundi, F., Oliva, E., & Benincasa, P. (2022). Effect of wheat crop nitrogen fertilization schedule on the phenolic content and antioxidant activity of sprouts and wheatgrass obtained from offspring grains. *Plants*, *11*(15), 2042. https://doi.org/10.3390/plants11152042
13. Farrokh Tehrani, P., Majd, A., Mahmoodzadeh, H., & Najad Satari, T. (2016). Effect of red and blue light-emitting diodes on germination, morphological and anatomical features of *Brassica napus*. *Advanced Studies in Biology*, *8*(4), 173-180. https://doi.org/10.12988/asb.2016.6832
14. Fenner, M., & Thompson, K. (2005). *The Ecology of Seeds*. Cambridge University Press, Cambridge.
15. Goto, E. (2003) Effect of light quality on growth of crop plants under artificial lighting. *Environmental Control in Biology*, *41*(2), 121-132. https://doi.org/10.2525/ecb1963.41.121
16. Heo, J., Lee, C., Chakrabarty, D., & Paek, K. (2002). Growth responses of marigold and salvia bedding plants as affected by monochromic or mixture radiation provided by a Light-Emitting Diode (LED). *Plant Growth Regulation*, *38*, 225–230. https://doi.org/10.1023/A:1021523832488

17. Hogewoning, S.W., Douwstra, P., Trouwborst, G., van Ieperen, W., & Harbinson, J. (2010). An artificial solar spectrum substantially alters plant development compared with usual climate room irradiance spectra. *Journal of Experimental Botany*, *61*, 1267-1276. https://doi.org/10.1093/jxb/erq005 PMID: 20202994
18. Hogewoning, S.W., Trouwborst, G., Maljaars, H., Poorter, H., van Ieperen, W., & Harbinson, J. (2010). Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light. *Journal of Experimental Botany*, *61*, 3107–3117.
19. Jacobsen, J., Barrero, J.M., Hughes, T., Julkowska, Taylor, J.M., Xu, Q., & Gubler, F. (2013). Roles for blue light, jasmonate and nitric oxide in the regulation of dormancy and germination in wheat grain (*Triticum aestivum* L.). *Planta*, *238*(1), 121-138. https://doi.org/10.1007/s00425-013-1878-0
20. Jafari, M., & Daneshvar, M.H. (2017). Indirect organogenesis of *Tagetes erecta* L. via hypocotyl explant. *Flower and Ornamental Plants*, *1*(2), 34-43. http://flowerjournal.ir/article-1-111-en.html
21. Jian-Fei, S., Meng-hui, S., & Xiao-Nan, Z. (2023). Response surface optimization of light conditions for organic matter accumulation in two different shapes of *Arthrospira platensis*. *Frontiers in Nutrition*, *9*, 1047685. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1047685
22. Johkan, M., Shoji, K., Goto, F., Hashida, S.N., & Yoshihara, T. (2010). Blue light-emitting diode light irradiation of seedlings improves seed quality and growth after transplanting in red leaf lettuce. *HortScience*, *45*, 1809–1814.
23. Khayyat, M., Moradinezhad, F., Safari, N., Nazari, S.F., Saeb, H., & Samadzadeh, A. (2014). Seed germination of basil and cress under NaCl and boron stress. *Journal of Plant Nutrition*, *37*(14), 2281-2290, https://doi.org/10.1080/01904167.2014.920388
24. Khosh-Khui, M. (2005). *Plant Propagation: Principle and Practices* (translated in Persian). Shiraz University Press, Shiraz, Iran. 983 pp. (In Persian).
25. Kitajima, K., & Fenner, M. (2000). Ecology of seedling regeneration. In: M. Fenner, (Ed.). *Seeds The Ecology of Regeneration in Plant Communities*. 2nd Ed. CABI Publishing, Wallingford, pp. 331-359. https://doi.org/10.1079/9780851994321.0331
26. Kobayashi, K., Amore, T., & Lazaro, M. (2013). Light-emitting diodes (LEDs) for miniature hydroponic lettuce. *International Journal of Optics and Photonics*, *3*, 74–77. https://doi.org/10.4236/opj.2013.31012
27. Kurepin, L.V., Walton, L.J., & Reid, D.M. (2007). Interaction of red to far red light ratio and ethylene in regulating stem elongation of *Helianthus annuus*. *Plant Growth Regulation*, *51*, 53-61. https://doi.org/10.1007/s10725-006-9147-x
28. Li, H.M., Xu, Z.G., & Tang, C.M. (2010). Effects of light-emitting diodes on growth and morphogenesis of upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.) plantlets *in vitro*. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, *103*, 155-163. https://doi.org/10.1007/s11240-010-9763-z
29. Li, Q., & Kubota, C. (2009). Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. *Environmental and Experimental Botany*, *67*, 59–64.
30. Lichtenthaler, H.K., & Buschmann, C. (2001). Chlorophylls and carotenoids: measurement and characterization by UV-Vis spectroscopy. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*. F4.3.1-F4.3.8. https://doi.org/10.1002/0471142913.faf0403s01
31. Lin, K.H., Huang, M.Y., Huang, W.D., Hsu, M.H., Yang, Z.W., & Yang, C.M. (2013). The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. capitata). *Scientia Horticulturae*, *150*, 86–91. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.10.002
32. Loi, M., Villani, A., Paciolla, F., Mulè, G., & Paciolla, C. (2021). Challenges and opportunities of Light-Emitting Diode (LED) as key to modulate antioxidant compounds in plants. A review. *Antioxidants*, *10*, 42. https://doi.org/10.3390/antiox10010042
33. Lone, B.A., Unemoto, L.K., Ferrari, E.A.P., Sadayo, L.T., Takahashi, A., & Faria, R.T. (2014). The effects of light wavelength and intensity on the germination of pitaya seed genotypes. *Australian 13 Journal of Crop Science*, *8*(11), 1475-1480.
34. Manivannan, A., Soundararajan, P., Halimah, N., Ko, C.H., & Jeong, B.R. (2015). Blue LED light enhances growth, phytochemical contents, and antioxidant enzyme activities of *Rehmannia glutinosa* cultured *in vitro*. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, *56*, 105–113. https://doi.org/10.1007/s13580-015-0114-1
35. Neff, M.M., Fankhauser, C., & Chory, J. (2000). Light: An indicator of time and place. *Genes and Development*, *14*, 257-271. https://doi.org/10.1101/gad.14.3.257
36. Nonogaki, H., Bassel, G.W., & Bewley, J.D. (2010). Germination-Still a mystery. *Plant Science*, *179*, 574–581.
37. Ortega-Base, P., & Arechiga, M. (2007). Seed germination of *Trichocereus terscheckii* (Cactaceae): Light, temperature and gibberellic acid effects. *Journal of Aird Encironments*, *69*(1), 169-179. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.09.009

38. Park, Y., & Runkle, E.S. (2018). Spectral effects of light-emitting diodes on plant growth, visual color quality, and photosynthetic photon efficacy: White versus blue plus red radiation. *PLoS ONE*, *13*(8), e0202386. https://doi.org/10.1371/journal. pone.0202386
39. Poudel, P.R., Kataoka, I., & Mochioka, R. (2008). Effects of red- and bluelight- emitting diodes on growth and morphogenesis of grapes. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, *92*, 147-153. https://doi.org/10.1007/s11240-007-9317-1
40. Rashidi, A., Narimani, R., & Moghaddam, M. (2021). The effect of light quality on germination and some physicochemical characteristics of valerian (*Valeriana officinalis*) seedlings. *Iranian Journal of Seed Science and Research*, *7*(4), 317-341. (In Persian). https://doi.org/10.22124/JMS.2020.4640
41. Rehman, M., Fahad, S., Saleem, M.H., Hafezz, M., UR Rahman, M.H., Liu, F., & Deng, G. (2020). Red light optimized physiological traits and enhanced the growth of ramie (*Boehmeria nivea* L.). *Photosynthetica*, *58*(4), 922-931. https://doi.org/10.32615/ps.2020.040
42. Rosado, D., Ackermann, A., Spassibojko, O., Rossi, M., & Pedmale, U.V. (2022). WRKY transcription factors and ethylene signaling modify root growth during the shade-avoidance response. *Plant Physiology*, *188*(2), 129 –1311. https://doi.org/10.1093/plphys/kiab493
43. Ryu, J.H., Seo, K.S., Choi, G.L., Rha, E.S., Lee, S.C., Choi, S.K., Kamg, S., & Bae, C. (2012). Effects of LED light illumination on germination, growth and anthocyanin content of dandelion (*Taraxacum officinale*). *Korean Journal of Plant Resources*, *25*(6), 731-738. http://dx.doi.org/10.7732/kjpr.2012.25.6.731
44. Sadat Seyedi, F., Ghasemi Nafchi, M., & Reezi, S. (2023). Effects of light spectra on morphological characteristics, primary and specialized metabolites of *Thymus vulgaris* L. *Heliyon*, *10*, e23032. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23032
45. Safari, N., Tehranifar, A., Kharrazi, M., & Shoor, M. (2022). Evaluation of the characteristics of Iris ferdowsii seed germination, a new species, in danger of extinction and native to Iran. *Flower and Ornamental Plants*, *7*(1), 27-40. http://flowerjournal.ir/article-1-219-en.html
46. Saleem, M.H., Rehman, M., Zahid, M., Imran, M., Xiang, W., & Liu, L. (2019). Morphological changes and antioxidative capacity of jute (*Corchorus capsularis*, Malvaceae) under different color light-emitting diodes. *Brazilian Journal of Botany*, *42*, 581-590, 2019. https://doi.org/10.1007/s40415-019-00565-8
47. Simlat, M., Ślęzak, P., Mos, M., Warchoł, M., Skrzypek, E., & Ptak, A. (2016). The effect of light quality on seed germination, seedling growth and selected biochemical properties of *Stevia rebaudiana* Bertoni. *Scientia Horticulturae*, *211*, 295–304. https://doi.org/ 10.1016/j.scienta.2016.09.009
48. Tanno, N. (2006). Blue light induced inhibition of seed germination: The necessity of the fruit coats for 34 the blue light response. *Physiologia Plantarum*, *58*(1), 18-20.
49. Walker, M.K., & Sesing, J. (1990). Temperature effect on embryonic abscisic acid levels during development of wheat grain dormancy. *Journal of Plant Regulation*, *9*, 51-56. https://doi.org/10.1007/BF02041941
50. Wang, S., Fang, H., Xie, J., Wu, Y., Tang, Z., Liu, Z., Lv, J., & Yu, J. (2021). Physiological responses of cucumber seedlings to different supplemental light duration of red and blue LED. *Frontiers in Plant Science*, *12*, 709313. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.709313
51. Wollaeger, H.M., & Runkle, E.S. (2014). Growth of impatiens, petunia, salvia, and tomato seedlings under blue, green, and red light-emitting diodes. *HortScience*, *49*, 734-740. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.49.6.734
52. Wu, M.C., Hou, C.Y., Jiang, C.M., Wang, Y.T., Wang, C.Y., Chen, H.H., & Chang, H.M. (2007). A novel approach of LED light radiation improves the antioxidant of pea seedlings. *Food Chemistry*, *101*, 1753-1758. https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2006.02.010
53. Yang, F., Feng, L., Liu, Q., Wu, X., Fan, Y., Raza, M.A., Cheng, Y., Chen, J., Wang, X., Yong, T., & Liu, W. (2018). Effect of interactions between light intensity and red-to- far-red ratio on the photosynthesis of soybean leaves under shade condition. Environ. *Journal of Experimental Botany*, *150*, 79–87. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.03.008
54. Ye, S., Shao, Q., Xu, M., Li, S., Wu, M., Tan, X., & Su, L. (2017). Effects of light quality on morphology, enzyme activities, and bioactive compound contents in *Anoectochilus roxburghii*. *Frontiers in Plant Science*, *8*, 857. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00857
55. Zaghdoud, C., Ollio, I., Solano, C.J., Ochoa, J., Suardiaz, J., Fernández, J.A., & Martínez Ballesta, M.d.C. (2023). Red LED light improves pepper (*Capsicum annuum* L.) seed radicle emergence and growth through the modulation of aquaporins, hormone homeostasis, and metabolite remobilization. *International Journal of Molecular Sciences*, *24*, 4779. https://doi.org/10.3390/ijms24054779
56. Zare Mehrjerdi, M., Safari, N., Kharrazi, M., Khadem, A., & Sharifi, A. (2024). The effect of different qualities of LED light on the morphophysiological indicators of *Cucumis sativus* L. var. Officer. *Journal of Horticultural Science*, *37*(4), 1029-1041. (In Persian). https://doi.org/10.22067/jhs.2023.80257.1222

57. Zhang, L., Liu, S., Zhang, Z., Yang, R., & Yang, X. (2010). Dynamic of different qualities on growth of *Toona sinensis* seedlings. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, *19*, 115–119.
58. Zhang, R.H., Xu, K., & Dong, C.X. (2008). Effect of light quality on photosynthetic characteristics of ginger leaves. *Scientia Agricultura Sinica*, *41*, 3722-3727.